DOI:10.19980/j.CN23-1593/G4.2023.08.003

基于虚拟仿真技术的模拟电子技术实验教学模式改革

王永玲，李剑锋*，赵玉杰，刘功亮，王季刚，赵 扬
（哈尔滨工业大学（威海），山东 威海 264209）

摘 要：面对高校信息化建设的需求及现有模拟电子技术课程实验的不足，利用LabVIEW的图形化编程能力和Multisim的仿真功能，设计由数据库模块、界面和功能模块、联合仿真模块和实验报告生成模块构成的模拟电子仿真实验系统，并以晶体三极管共射放大电路的设计分析实验为例，探讨虚拟仿真实验教学的开展方法。基于虚拟仿真技术的模拟电子技术实验教学方法突破了硬件设备的限制，激发学生学习的兴趣和积极性，实现了课程实验随时随地的高效开展。

关键词：LabVIEW；Multisim；联合仿真；模拟电子技术；实验教学
中图分类号：G642 文献标志码：A 文章编号：2096-000X（2023）08-0010-06

Abstract: Facing the needs of information construction in colleges and universities and the shortcomings in analog electronic technology experiment, using the graphical programming ability of LabVIEW and the simulation function of Multisim, an analog electronic simulation experiment system composed of database module, interface and function module, co-simulation module and experiment report module is designed. Taking the experiment of "design and analysis of transistor co-emission amplifier circuit" as an example, the teaching method of virtual simulation experiment is discussed. The teaching method of analog electronic technology experiment based on virtual simulation technology breaks through the limitation of hardware equipment, stimulates students´ interest and enthusiasm in learning, and realizes the efficient development of experiments anytime and anywhere.

Keywords: LabVIEW; Multisim; co-simulation; analog electronic technology; experimental teaching

模拟电子技术实验是模拟电子技术课程的重要环节，是验证课堂理论、锻炼动手能力、培养创新能力的重要途径。

模拟电子技术实验的开展方式可分为实验箱、便携式“口袋实验室”[1-3]和虚拟仿真系统[4-5]3类。随着现在信息技术的发展，以及《教育信息化十年发展规划（2011—2020年）》《关于一流本科课程建设的实施意见》等文件的发布，通过LabVIEW、Matlab、Multisim和Unity3D等技术手段实现的电子技术虚拟仿真系统应运而生[6-9]。特别是在新冠感染疫情期间，线下实物实验难以开展，仿真实验系统极大地解决了学生异地完成课程实验的需求，且具有形象生动、易于操作、结果直观和安全性高等优点[10]。

本文利用LabVIEW的图形化编程能力和Multisim的仿真功能，以联合仿真和模块化的方式设计了模拟电子仿真实验系统，并探讨了基于虚拟仿真技术的模拟电子技术实验的开展方法。

一 仿真实验系统设计

仿真实验系统利用Access数据库进行用户登录验证，利用LabVIEW进行系统的界面和功能设计。用户进入实验系统后，系统会自动连接至Multisim进行联合仿真，从而获得相应的实验数据，并逐步完成整个实验过程。系统的总体结构如图1所示。

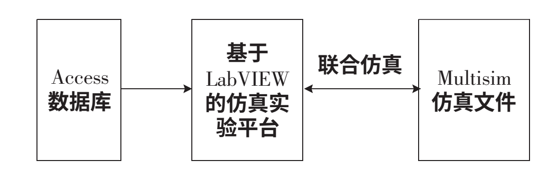


图1 仿真实验系统的总体结构

（一） 数据库模块

数据库作为实验系统搭建的底层需要，用来存储实验系统的用户信息。数据库的读写操作全部在LabVIEW中控制，借助第三方数据库工具包，配合SQL语言对数据库进行读写操作。数据库操作的流程如图2所示。

基金项目：国家自然科学基金“面向空间动态网络的编码感知传输机制与资源分配方法”（61971156）；教育部产学合作协同育人项目“基于RIGOL测试仪器的电子技术实践课程体系开发”（202102371037）；山东省本科高校教学改革研究项目“新工程教育背景下工科类专业课程思政教学体系构建与实践”（Z2021201）、“利于工科大学生个性化发展的教学模式研究”（M2018B334）；哈尔滨工业大学（威海）“课程思政”专项课程建设项目“模拟电子技术基础”（KCSZ202103）、“传感技术及应用”（KCSZ202101）
第一作者简介：王永玲（1979-），女，汉族，山东诸城人，博士，副教授。研究方向为智能控制。
*通信作者：李剑锋（1977-），男，汉族，山西晋中人，博士，副教授。研究方向为无人系统自主定位导航技术、机器视觉。

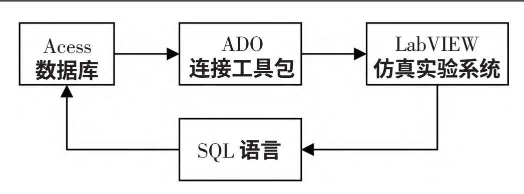


图2 数据库操作流程图

系统利用Access数据库，并用第三方LabVIEW SQL工具包实现数据库连接。利用安装后的工具包可完成Access数据库的读写操作，如图3所示。

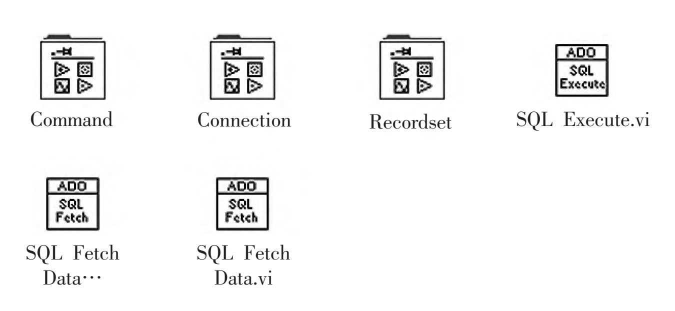


图3 数据库连接工具包控件

（二） 仿真实验系统功能模块

仿真实验系统的功能设计通过模块化的子VI完成。学生登录实验系统后，可选择需要完成的实验，并根据实验目的、实验步骤等信息完成本次实验的各个环节，记录实验数据，最后生成实验报告，仿真实验系统的功能流程如4所示。

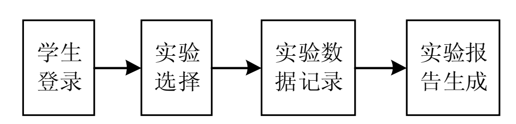


图4 仿真实验系统的功能流程图

（三） Multisim与LabVIEW的联合仿真

系统利用LabVIEW 2020与Multisim 13.0联合仿真的方式实现LabVIEW与Multisim之间的数据交互，其原理如图5所示。

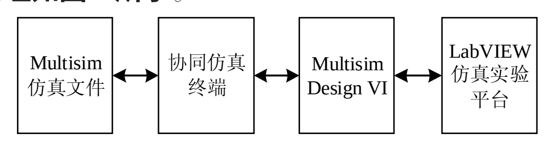


图5 联合仿真原理图

在需要联合仿真的Multisim电路原理图中放置Hierarchical Connector，通过LabVIEW协同仿真终端设置接口的名称、输入输出状态和类型，然后将其连接至需要测量或操作的电路中。

在LabVIEW仿真实验系统的程序框图中放置控制与仿真循环模块，设置电路仿真的模拟参数和定时参数，然后在控制与仿真循环模块中放置Multisim Design VI，导入设置好的Multisim仿真文件，放置数值控件和*XY*图来调整电路参数和显示输出波形。

系统除采用LabVIEW官方的联合仿真模块外，还采用第三方联合仿真工具包LabVIEW Multisim Connectivity Toolkit BETA，用以检测LabVIEW与Multisim的连接状态。

二 基于联合仿真的晶体三极管共射放大电路设计分析实验系统设计

静态工作点是否合理与晶体三极管的动态性能息息相关，本实验的基本任务是设计带分压偏置的共射放大电路，设置合理的静态工作点，测量晶体三极管的放大倍数、输入电阻和输出电阻，掌握静态工作点的位置对输出波形的影响，其实验步骤如图6所示。

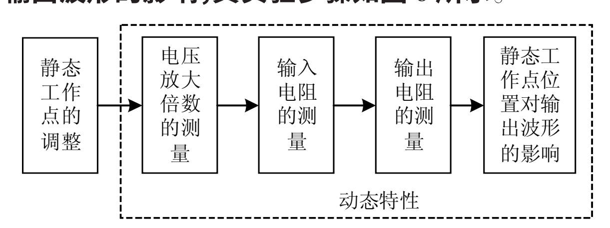


图6 晶体三极管共射放大电路设计分析的实验步骤

（一） 晶体三极管共射放大电路的静态工作点调整实验

根据实验原理和要求，在Multisim中设计带分压偏置的共射放大电路，加入压控电压源和压控电阻，放置并设置Hierarchical Connector，如图7所示。其在LabVIEW中的联合仿真控件如图8所示。

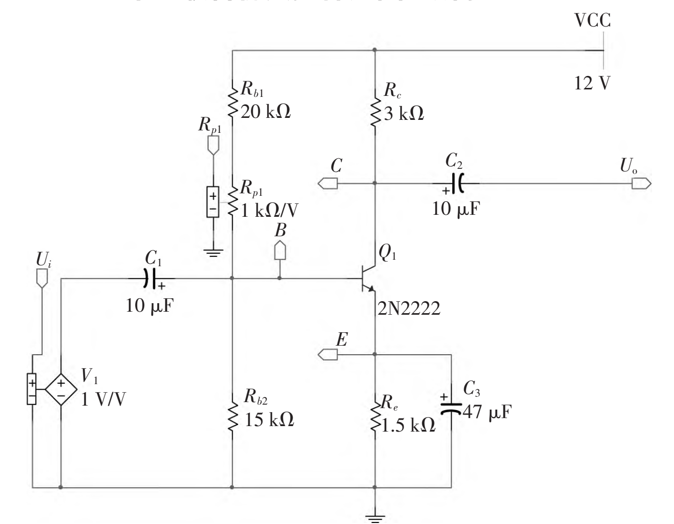


图7 静态工作点调整实验的仿真电路图



图8 静态工作点调整实验的联合仿真控件接口

在LabVIEW中，选择Sine Signal控件，将其设置为输出频率1 kHz、峰峰值30 mV的正弦交流信号 选择

旋钮控件控制电阻 R_{P1} 的电阻值；选择 XY 图实时显示电压波形；选择表格控件记录实验数据，便于实验报告的生成。静态工作点调整实验的系统界面如图 9 所示。静态工作点调整实验系统的程序框图如图 10 所示。

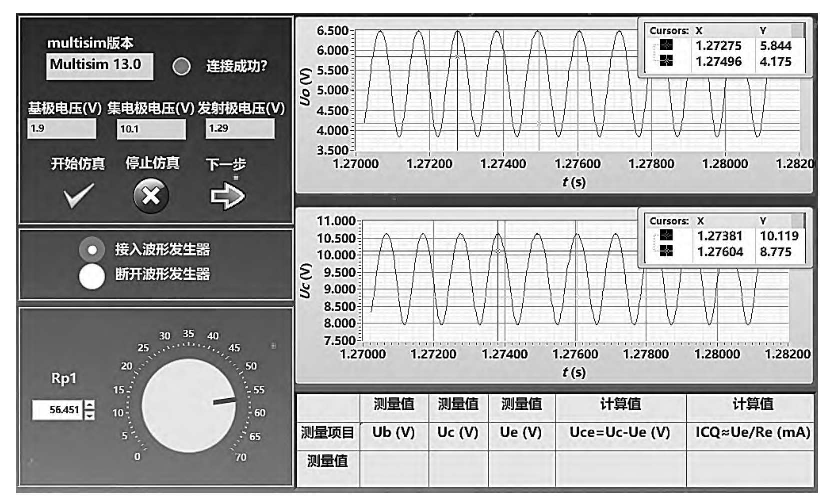


图 9　静态工作点调整实验系统界面

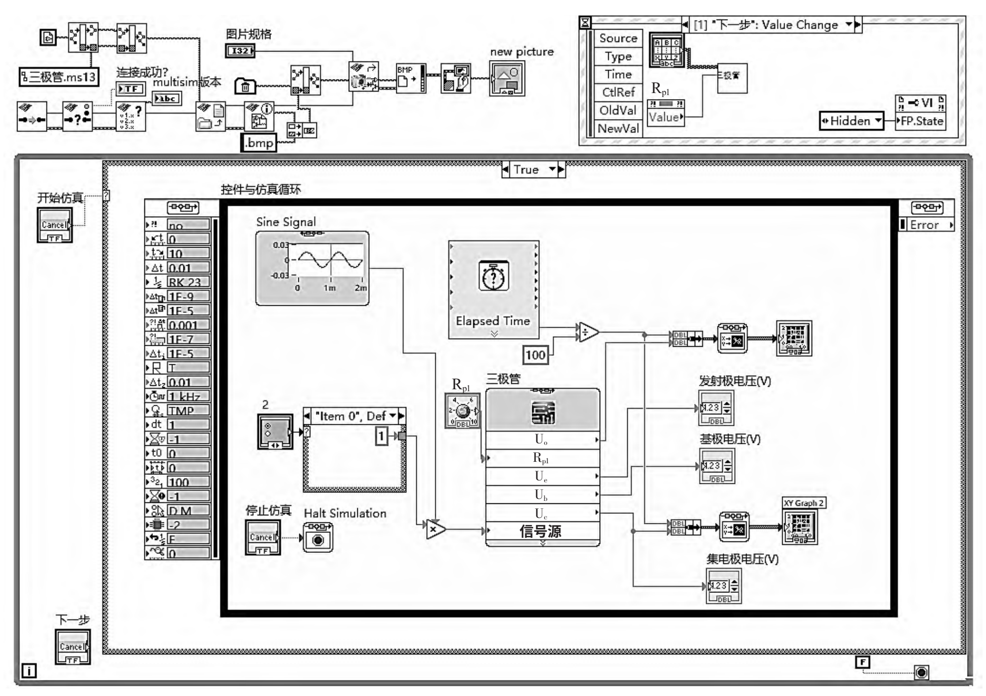


图 10　静态工作点调整实验系统程序框图

（二）　晶体三极管共射放大电路的动态特性实验

为了研究晶体三极管共射放大电路的反馈电阻 R_{e1}、负载电阻 R_L 和集电极电阻 R_C 对三极管动态性能的影响，这些电阻均设置为压控电阻，并加入基极电阻 R_s 以间接测量三极管的输入电阻，并将放大电路的输入信号设置为输出频率和幅值均可调的正弦交流信号，其在 Multisim 中的仿真电路图如 11 所示。

晶体三极管共射放大电路动态特性实验系统中的波形发生器幅值调节和频率调节通过数值滑动控件和乘法器实现；反馈电阻 R_{e1} 通过单选按钮实现是否接入；集电极电阻 R_C 通过单选按钮实现接入 1.5 kΩ 或 3 kΩ；负载电阻 R_L 通过条件结构和枚举控件实现开路、接入 3 kΩ 或 10 kΩ。参数调整部分的程序框图如图 12 所示。

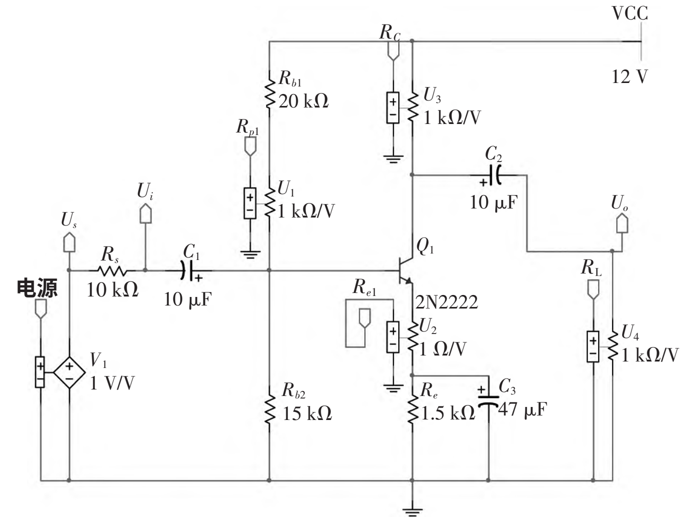


图 11　共射放大电路的动态特性实验的仿真电路图

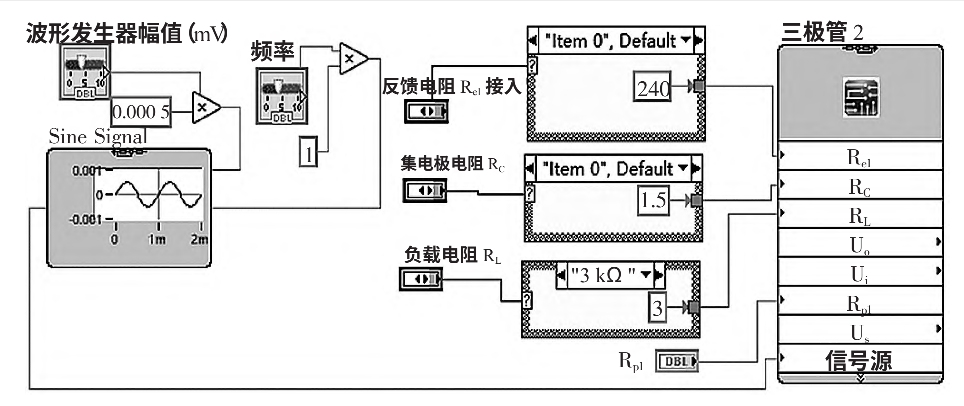


图 12 参数调整部分的程序框图

(三) 实验报告的生成

实验完成后，利用 NI 插件库中自带的 LabVIEW Report Generation 工具包生成实验报告。实验报告会自动生成用户的学号、姓名、实验数据及实验报告的提交时间等，其程序框图如图 13 所示。

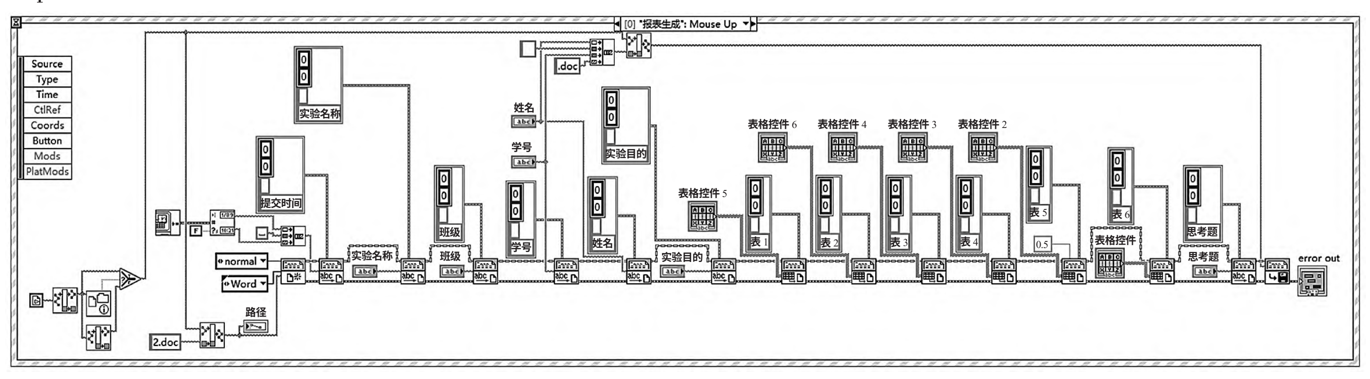


图 13 实验报告生成模块的程序框图

三 晶体三极管共射放大电路设计分析的虚拟仿真与参数调整

(一) 静态工作点调整

在图 9 所示系统界面中点击“开始仿真”按钮，选择“接入波形发生器”，观察输出电压 U_o 的波形，如图 14 所示。

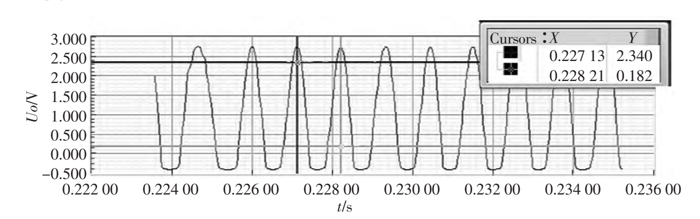


图 14 静态工作点过高，输出波形失真

由图 14 可知，由于静态工作点过高，输出波形失真较为严重。然后逐渐增大控制电阻 R_{P1} 的值，直至获得不失真且幅值最大的电压输出，此时为最佳静态工作点，如图 15 所示。

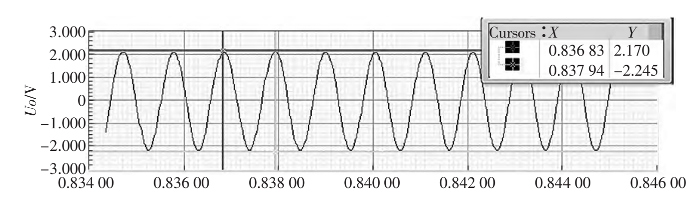


图 15 最佳静态工作点，输出波形无失真且幅值最大

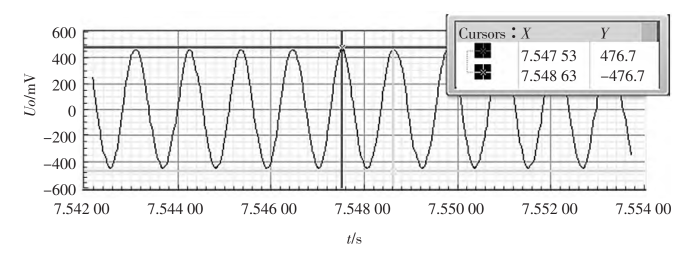
选择“断开波形发生器”，记录基极电压 U_B、集电极电压 U_C 和发射极电压 U_E，并计算静态集电极电流 I_{CQ}，见表 1。

表 1 静态工作点的调整实验数据

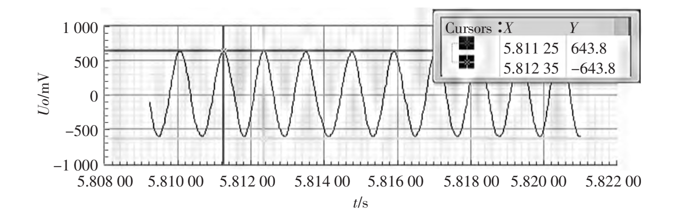
U_B/V	U_C/V	U_E/V	$U_{CE}=U_C-U_E$ /V	$I_{CQ}\approx U_E/R_e$ /mA
3.66	6.01	3.02	2.99	2.01

(二) 电压放大倍数的测量

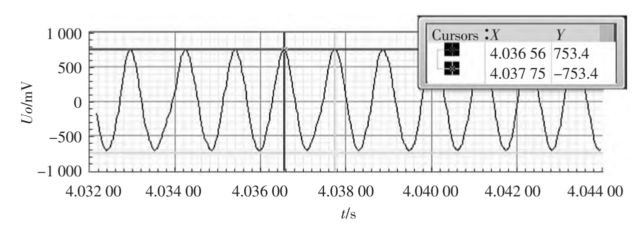
保持静态工作点不变，波形发生器调节至频率 1 kHz，输入电压 U_i 的峰峰值为 10 mV，分别测量反馈电阻 R_{e1} 是否接入，集电极电阻 R_C 为 1.5 kΩ 或 3 kΩ，负载电阻 R_L 为 3 kΩ、10 kΩ 或无穷大时对应的输出电压 U_o 的波形，部分实验结果如图 16 所示。



(a) 不接入 R_{e1}，R_L=3 kΩ，R_C=3 kΩ



（b）　不接入 R_{e1}，R_L=10 kΩ，R_C=3 kΩ



（c）　不接入 R_{e1}，R_L=无穷大，R_C=3 kΩ

图 16　电压放大倍数测量的部分输出电压波形

在 XY 波形图中，移动游标，记录输出电压的峰峰值 U_{opp}，并计算放大倍数|Au|，见表 2。

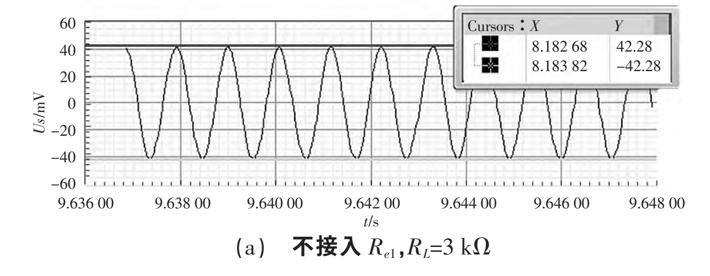
表 2　电压放大倍数的测量实验数据

R_{e1}	R_L/kΩ	R_C/kΩ	U_{opp}/mV	$\|A_u\|$
不接入	3	1.5	712.4	71.24
不接入	3	3	953.4	95.34
不接入	10	1.5	904.2	90.42
不接入	10	3	1 287.6	128.76
不接入	∞	1.5	1 019.2	101.92
不接入	∞	3	1 506.8	150.68
接入	3	1.5	38.36	3.84
接入	3	3	55.90	5.59
接入	10	1.5	50.96	5.10
接入	10	3	83.84	8.38
接入	∞	1.5	59.18	5.92
接入	∞	3	106.84	10.68

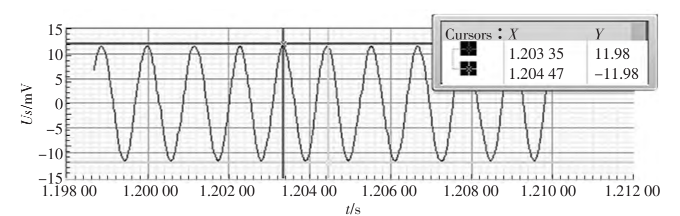
从表 2 中可以看出，接入电阻 R_{e1} 后，系统的放大倍数减小；集电极电阻 R_C 越大，系统的放大倍数越大；负载电阻 R_L 越大，系统的放大倍数越大。

（三）　输入/输出电阻测量

输入电阻测量时，保持静态工作点不变，波形发生器为调节至频率 1 kHz，输入电压 U_i 的峰峰值 10 mV，分别测量反馈电阻 R_{e1} 是否接入，负载电阻 R_L 为 3 kΩ 或无穷大时对应的输入电压 U_s 的波形，部分实验结果如图 17 所示。



（a）　不接入 R_{e1}，R_L=3 kΩ



（b）　接入 R_{e1}，R_L=3 kΩ

图 17　输入电阻测量的部分输入电压波形

在 XY 波形图中，移动游标，记录输入电压的峰峰值 U_{spp}，并计算输入电阻 r_i，如公式(1)所示

$$r_i=\frac{U_i}{i}=\frac{U_iR_s}{U_s-U_i}\text{。} \tag{1}$$

输入电阻的测量实验数据见表 3。

表 3　输入电阻的测量实验数据

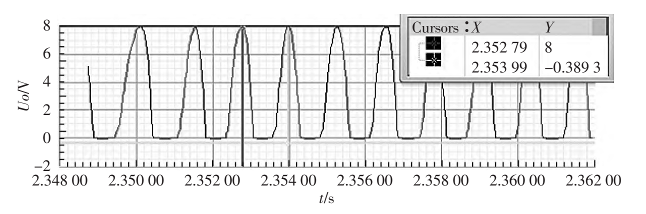
R_{e1}	R_L/kΩ	U_{spp}/mV	r_i/kΩ
不接入	3	84.56	1.34
不接入	∞	84.56	1.34
接入	3	23.96	7.16
接入	∞	24.36	6.96

从表 3 中可以看出，接入电阻 R_{e1} 后，放大电路的输入电阻增大；负载电阻 R_L 对放大电路的输入电阻基本没有影响。

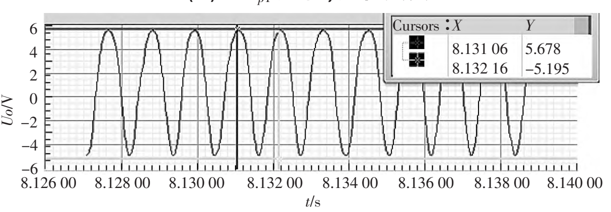
输出电阻的测量方法与输入电阻的测量方法类似，不再累述。

（四）　静态工作点的位置对输出波形的影响

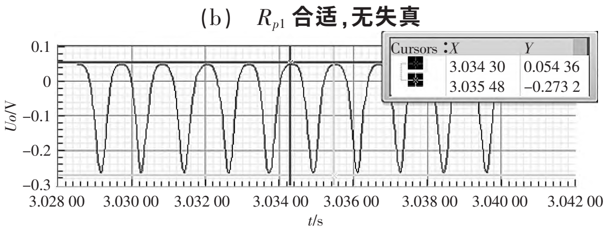
波形发生器调节至频率 1 kHz，输入电压 U_i 的峰峰值 80 mV，不接入反馈电阻 R_{e1}，集电极电阻 R_C 设置为 3 kΩ，负载电阻 R_L 为无穷大，调整 R_{p1} 的值，不同情况的波形输出如图 18 所示。



（a）　R_{p1} 过小，饱和失真



（b）　R_{p1} 合适，无失真



（c）　R_{p1} 过大，截止失真

图 18　静态工作点的位置对输出波形的影响

从图18中可以看出，R_{p1}过小，静态工作点过高，放大电路饱和失真；R_{p1}过大，静态工作点过低，放大电路截止失真；R_{p1}合适，静态工作点适中，放大电路无失真。

（五）实验报告的生成

实验完成后，点击“报告生成”，可生成本次实验的实验报告，如图19所示。

实验名称：晶体三极管共射放大电路的研究与设计

提交时间：2022/8/22 7:13

班级：1802203

学号：180220301

姓名：王

1.实验目的

1）掌握晶体管共射放大电路静态工作点的调整方法。

2）掌握晶体管共射放大电路主要性能指标的测量方法。

3）掌握静态工作点对放大电路动态特性的影响。

2.实验数据

表1 静态工作点的测试实验数据

U_B/V	U_C/V	U_E/V	$U_{CE}=U_C-U_E$ /V	$I_{CQ}\approx U_E/R_e$ /mA
3.66	6.01	3.02	2.99	2.01

图19 生成的部分实验报告

四 结论

传统的模拟电子技术实验课程存在时空限制、器材老化、数据不准和统计困难等不足。基于LabVIEW和Multisim联合仿真的模拟电子技术虚拟仿真实验系统突破了硬件实验系统的限制，满足了高校在硬件设备短缺的条件下，特别是在疫情期间开展模拟电子技术实验的需求，实现了课程实验的全天候、高效开展，激发了学生的兴趣和学习积极性，提高了实验教学的质量。

参考文献：

[1] 吴平，闫正兵，陈小林，等.基于雨课堂和雷实验的智能实验系统设计[J].实验室研究与探索，2020，39(7)：143-146.
[2] 张月霞.口袋实验室的教学改革[J].教育教学论坛，2018(29)：265-266.
[3] 金建辉，邵永成，谢鹤龄，等.基于便携实验室的实验教学模式研究[J].实验科学与技术，2021，19(1)：110-114.
[4] 叶晶晶，杨洁.模拟电子技术实验仿真系统研究[J].电子测试，2020(18)：5-7.
[5] 孙丹丹，张晓磊，赵同刚，等.基于虚拟仿真技术的电子电路实验教学探索[J].高教学刊，2020(35)：108-111.
[6] 周南权，全晓莉，曾自强.基于LabVIEW的数字电路虚拟演示实验的研究[J].实验室科学，2020，23(3)：85-87，91.
[7] 刘恒娟.基于MATLAB的电力电子电路仿真实验平台[J].实验室研究与探索，2020，39(8)：134-137，200.
[8] 任君玉.基于Multisim的模拟电子技术实验教学改革[J].实验科学与技术，2022，20(3)：57-63.
[9] 吴迪，那振宇，谭克俊，等.基于Unity3D的电路原理虚拟实验室设计[J].电气电子教学学报，2020，42(2)：158-161.
[10] 杨颖，肖潭，南景富，等.高校虚拟仿真实验教学发展趋势的文献计量分析[J].实验技术与管理，2020，37(12)：24-28，32.

（上接9页）

究型教学改革[J].高等工程教育研究，2021(5)：29-33.
[3] 钟必能，张洪博.人工智能时代数字图像处理的教学改革[J].科学咨询(教育科研)，2021(9)：68-69.
[4] 陈颖频，喻飞，王灵芝，等.“数字图像处理”课程教学改革[J].电气电子教学学报，2021，43(5)：82-87.
[5] 王宪，杨书仪，凌启辉.图像处理“立体化”教学体系探索[J].大学教育，2020(11)：75-78.
[6] 于力，陈忠道.高校研究生教学改革思考——以“数字图像处理”课程为例[J].工业和信息化教育，2020(9)：50-54.
[7] 迟剑宁，于晓升，严志刚，等.数字图像处理与机器视觉课程中“深度学习”式思政教学的探索与实践[J].中国多媒体与网络教学学报(上旬刊)，2021(9)：65-68.
[8] GONZALEZ R C，WOODS R E. Digital Image Processing [M].3rd Edition. Upper Saddle River，NJ，USA：Pearson Education，Inc，2010.
[9] GONZALEZ R C，WOODS R E. Digital Image Processing [M]. 4th Edition. New York，NY，USA：Pearson Education Ltd，2018.
[10] DENG J，DONG W，SOCHER R，et al. ImageNet：A large-scale hierarchical image database[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition，Miami Beach，FL，USA，2009：248-255.
[11] KRIZHEVSKY A. Learning multiple layers of features from tiny images [D]. Master's thesis，Toronto，Ontario，Canada：University of Toronto，2009.
[12] SIMONYAN K，ZISSERMAN A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations，San Diego，CA，USA，2015：1-14.
[13] HE K，ZHANG X，REN S，et al. Deep residual learning for image recognition[C]// Proceedings of the 29th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition，Las Vegas，NV，USA，2016：770-778.
[14] SANDLER M，HOWARD A，ZHU M，et al. MobileNetV2：Inverted residuals and linear bottlenecks[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition，Salt Lake City，UT，USA，2018：4510-4520.
[15] 王延年，李文婷，任劼.基于生成对抗网络的单帧图像超分辨算法[J].国外电子测量技术，2020，39(1)：26-32.
[16] 李宇.基于神经网络与注意力机制的图像修复算法[D].成都：中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所)，2020.
[17] 陈琦，潘伟民.基于自编码器的图像去噪设计与实现[J].新疆师范大学学报(自然科学版)，2018，37(2)：80-85.